基于俯冲模型的 SAR 成像处理和几何校正

孙 兵 周荫清 陈 杰 李春升

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对高速俯冲状态下斜视 SAR(Synthetic Aperture Radar)高分辨率成像处理和几何校正方法进行研究,建立了通用的 SAR 空间几何模型,在此基础上推导了俯冲状态下的等效斜视距离模型,并给出相应的回波信号数学模型. 根据高速俯冲 SAR 的信号特点,采用 Burst 工作模式,利用改进的 ECS(Extended Chirp Scaling)成像算法进行成像处理,给出了成像处理流程和相位补偿因子表达式. 根据距离方程和多普勒定位方程组推导了针对 ECS 成像算法的几何校正计算公式. 计算机仿真结果表明,改进 ECS 算法能够对俯冲模式 SAR 进行高分辨率成像处理,并对斜视 SAR 具有较好的处理能力,提出的几何校正方法能够很好地修正几何失真.

关 键 词: 合成孔径雷达; 信号处理; 雷达成像; 俯冲模型; 扩展调频变标算法; 几何校正

中图分类号: TN 957

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0435-05

SAR imaging formation and geometric correction method based on diving model

Sun Bing Zhou Yinqing Chen Jie Li Chunsheng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The squint SAR(synthetic aperture radar) high resolution imaging formation and geometric correction method based on the diving model were studied. The general three-dimensional geometric model was founded based on the SAR movement mode. The equivalent squint range model was derived from this general geometric model and the echo signal expression was given based on this range model. According to the signal´s characteristic, burst work mode was adopted in diving SAR, and a modified ECS(extended chirp scaling) imaging algorithm was utilized to form high resolution image. The imaging formation flow chart and four ECS phase compensation factors were presented. According to the range equation and Doppler positioning equation, geometric correction calculating expressions corresponding to ECS algorithm were derived. The computer simulation results illuminated that the modified ECS algorithm could be used to form high resolution image for diving model SAR and squint SAR, also geometric distortion could be calibrated with this correction method.

Key words: synthetic aperture radar; signal processing; radar imaging; diving model; extended chirp scaling algorithm; geometric correction

通常机载 SAR(Sythetic Aperture Radar)系统的载机平台相对地面目标作水平匀速直线运动,而一些特殊应用领域中,SAR 载体平台(如战斗机俯冲、导弹再入)无法做水平匀速直线运动,同时具有一定的垂直速度,这就是俯冲模式的 SAR. 由于垂直速度分量的存在,特别是高速俯冲速度使得信号特性发生显著变化,导致一般的成像算法失效,为此需要构建更具一般性的统一信

收稿日期: 2005-04-20

作者简介: 孙 兵(1981-),男,湖北广水人,博士生, sun@ee.buaa.edu.cn.

号模型来研究俯冲 SAR 成像和几何校正方法,常规 SAR 只是俯冲速度为 0 的特例.

文献[1]中研究了高速俯冲条件下 SAR 成像方法,提出了一种等效正侧视的工作模式,在这种模式下由于在场景中心的目标距离徙动较小,能够使用 SPECAN(Spectrum Analysis)算法成像处理,并且给出基于 SPECAN 算法的几何校正方法.由于实际条件的限制或者特殊需要,一般情况下会偏离这种等效正侧视工作模式,即使在等效正侧视条件下,测绘带的近距和远距都会偏离等效正侧视,SPECAN 算法的使用受限.

文献[2]提出了处理 ScanSAR 的一种高精度成像算法 ECS(Extended Chirp Scaling)算法,但文中也只侧重分析了正侧视情形.

本文首先从通用空间几何关系推导了基于俯冲模型的等效斜视距离模型,在基于等效斜视距离模型改进 Chirp Scaling 算法[3]和 ECS 算法的基础上,得到了基于俯冲模型的改进 ECS 算法以及相应的几何校正方法.计算机仿真结果表明:这种成像算法能够较好地完成距离徙动校正和相位补偿,实现基于俯冲模型的高分辨率成像;几何校正方法能够修正俯冲模型下的几何失真.

1 俯冲模型分析

1.1 俯冲 SAR 空间几何模型

图 1 给出了通用模型下的俯冲 SAR 几何关系示意图.设雷达运动平台沿 ABC 直线运动,3 个方向的速度分量分别为 V_x, V_y, V_z.其中 H_0, r_0, θ_L, φ 分别为合成孔径中心时刻对应的高度、斜距、入射角和等效锥角;θ 为波束指向地面投影与 X 轴夹角(水平方位角),x_0 和 z_0 为波束瞄准点对应的 X 和 Z 坐标,θ_{xz}为偏航角.

从几何关系可以得到 PB 斜距关系式

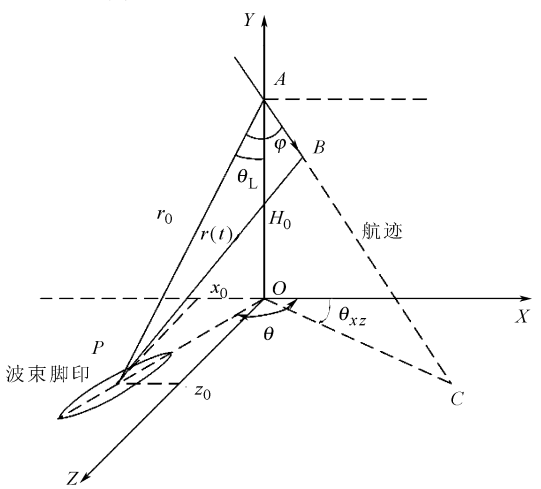


图 1 弹载 SAR 空间几何关系示意图

$$r(t;r_0) = \left[(V_x t - r_0 \sin\theta_L \cos\theta)^2 + (r_0 \cos\theta_L + V_y t)^2 + (V_z t - r_0 \sin\theta_L \sin\theta)^2\right]^{1/2} = \left[r_0^2 - 2r_0 \cos\varphi (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{1/2} t + (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2) t^2\right]^{1/2} \quad (1)$$

令 $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$,则有

$$r(t;r_0) = (r_0^2 - 2r_0 \cos\varphi V t + V^2 t^2)^{1/2} \quad (2)$$

等效距离模型的表达式与文献[3]的等效距离模型在形式上是相同的,但是这里的合速度 V 包含垂直速度分量,因此机(星)载斜视 SAR 的等效斜视距离模型是俯冲模式距离模型的一种特例.

1.2 回波信号模型

设 SAR 在脉冲宽度发射线性调频信号,雷达相干接收后的点目标回波信号表达式为[4]

$$S(\tau, t; r_0) = \sigma \cdot G(t) \cdot p\left[\tau - \frac{2r(t;r_0)}{C}\right] \cdot \exp\left\{-j\pi\left[\frac{4}{\lambda} r(t;r_0) + b\left(\tau - \frac{2r(t;r_0)}{C}\right)^2\right]\right\} \quad (3)$$

式中 C 为光速;λ 为发射脉冲波长;b 为调频率;σ 为点目标后向散射特性;τ 和 t 分别为距离向和方位向时间;$G(t)$ 是方位向天线方向性函数;$p(\tau)$发射脉冲包络;$r(t;r_0)$是点目标到雷达斜距的变化函数.

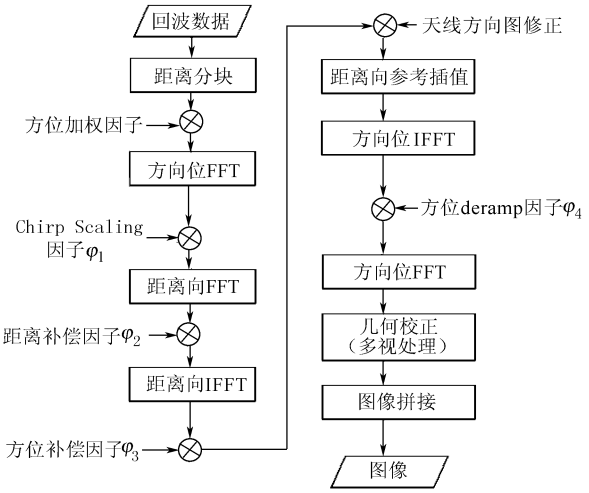
2 基于俯冲模型的 ECS 成像方法

2.1 成像算法

高速俯冲 SAR 一般采用 burst 工作模式,文献[1]指出了采用利用子孔径信号成像带来的好处:减小运动平台不稳定性的影响以及减小运算量.ECS 算法常用来处理 ScanSAR 块数据,对基于俯冲模型的子孔径信号进行高精度成像处理也是适用的.

由于高速俯冲速度的存在,使测绘带内的多普勒参数变化会很大,多普勒中心频率变化甚至会超过几倍脉冲重复频率,此时需要从距离向分块处理.另外 ECS 算法在完成距离压缩以后,距离门对应的斜距发生变化,同时多普勒参数和等效锥角需要对应调整,因此参数的插值是本算法的关键点之一.基于俯冲模型的 ECS 算法流程图如图 2 所示.

由于等效距离模型和回波信号模型形式上与常规 SAR 相同,所以可以采用相同形式的相位补偿因子,表达式如式(4)~式(7),详细推导见文献[3,5].



FFT—傅里叶变换;IFFT—逆傅里叶变换.

图 2　俯冲模型 ECS 算法流程图

$$\varphi_1 = \exp\{-\mathrm{j}\pi b_r(f;r_{ref})C_s(f)[\tau-\tau_{ref}(f)]^2\} \tag{4}$$

$$\varphi_2 = \exp\left\{-\mathrm{j}\frac{\pi f_\tau^2}{b_r(f;r_{ref})[1+C_s(f)]}\right\}\cdot \exp\left\{\mathrm{j}\frac{4\pi}{c}f_\tau r_{ref}C_s(f)\right\} \tag{5}$$

$$\varphi_3 = \exp\left\{-\mathrm{j}\frac{4\pi r}{\lambda}\left[1-\sin\varphi\sqrt{1-\left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2}\right]\right\}\cdot \exp\{\mathrm{j}[\Theta_1(f)+\Theta_2(f;r)]\}\cdot \exp\left\{\mathrm{j}\pi\left[\frac{f^2}{k_{scl}}+\frac{2f_d}{k_{scl}}f\right]\right\} \tag{6}$$

$$\varphi_4 = \exp\left\{\mathrm{j}\pi k_{scl}t^2+\mathrm{j}\pi\frac{f_d^2}{k_{scl}}\right\} \tag{7}$$

式中　f_d 为各距离门的多普勒中心频率;k_{scl}为差频处理调频率,通常取参考斜矩处的多普勒调频率.

$$C_s(f) = \frac{\sin\varphi_{ref}}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2}}-1 \tag{8}$$

$$\tau_{ref}(f) = \frac{2}{C}r_{ref}[1+C_s(f)] \tag{9}$$

$$b_r(f;r_{ref}) = \frac{b}{1+br_{ref}\sin\varphi_{ref}\frac{2\lambda}{C^2}\left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2\Big/\left[1-\left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2\right]^{1.5}} \tag{10}$$

$$\Theta_1(f) = \frac{4\pi}{C^2}b_r(f;r_{ref})\cdot [1+C_s(f)]C_s(f)\left(r\frac{\sin\varphi_{ref}}{\sin\varphi}-r_{ref}\right)^2 \tag{11}$$

$$\Theta_2(f;r) = \frac{2\pi rf}{V}\cos\varphi \tag{12}$$

以上各式中下标为 ref 的变量为参考斜距处的相应参量,通常选取波束瞄准点在 0 时刻的相应参量. 方位加权因子和距离向加权根据主瓣展宽和峰值旁瓣比要求采用相应的加权函数,方位加权需要在时域进行,距离加权一般在频域进行. 天线方向图修正主要为了消除图像的扇贝效应,特别是在方位向和距离向需要拼接时需要修正,文献[6]中给出了修正方法和公式.

距离压缩后距离向采样时间变为$\frac{2r\sin\varphi}{C\sin\varphi_{ref}}$,根据这个关系插值重新计算各距离门对应的斜距、多普勒中心频率、多普勒调频率、等效锥角等参数. 距离压缩之后的处理都需要依据插值后参数,距离向有效图像的保留也必须考虑距离压缩斜距的变化.

2.2　几何校正

俯冲模式 SAR 中出现几何失真除了常规条带式 SAR 中的失真外还有俯冲速度引起的高度失真,因此几何校正要考虑地斜变换、斜视的影响以及高度的变化. 另外几何校正必须针对成像处理使用的算法,文献[1]中给出了针对 SPECAN 算法的校正方法.

假设在每个 Burst 回波录取过程中导弹作匀速直线运动,同时认为导弹 Z 向速度分量为 0(如果 Z 向速度不为 0,经过简单的坐标系变换即可得到). 俯冲模式 SAR 几何校正示意图如图 3 所示.

利用斜距方程和多普勒方程[7]得到方程组如式(13)所示,图中标注相关符号的计算如式(14)~式(17).

$$\left.\begin{aligned}(x-\Delta x)^2+H_1^2+z^2 &= R_j^2\\ -\frac{2V\cos\varphi}{\lambda} &= f_{dj}\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

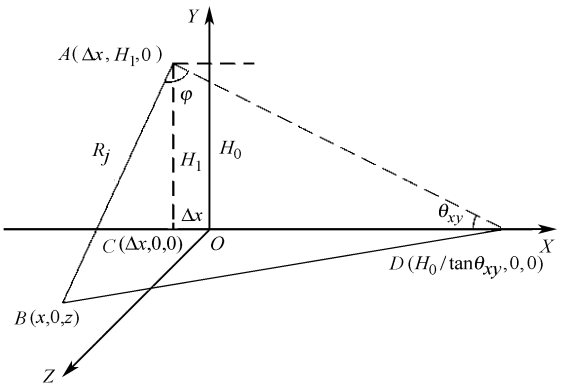


图 3　俯冲模式 SAR 几何校正(ECS 成像算法)示意图

$$\Delta x = V_x \Delta t \tag{14}$$

$$H_1 = H_0 + V_y \Delta t \tag{15}$$

$$\theta_{xy} = \arctan \frac{-V_y}{V_x} \tag{16}$$

$$\Delta t = \frac{N_i P_{rf}}{N_{FFT} k_{scl}} + \frac{f_{dj} - f_{dc}}{k_{scl}} \tag{17}$$

式中 P_{rf}为脉冲重复频率;N_{FFT}为方位向 FFT 点数;R_j,f_{dj}分别为相应距离门对应的斜距和多普勒频率;f_{dc},k_{scl}分别为参考斜距对应的多普勒中心频率和差频处理调频率.

根据上面的公式逐点计算出各点对应的 *XOY* 坐标系坐标,考虑到坐标计算值不一定为整数,需要把像素能量分配到邻近的网格中去. 由于网格像素分辨率一般低于原始成像图像分辨率,能量分配过程同时完成多视处理. 如果考虑 *Z* 方向的速度,首先需要将 *B* 点的坐标经过旋转变换到新坐标系中,使得 *X* 方向为原来坐标系中的航迹地面投影方向. 最后再将在新坐标系中的 *B* 点坐标变换到原来坐标系,完成图像校正.

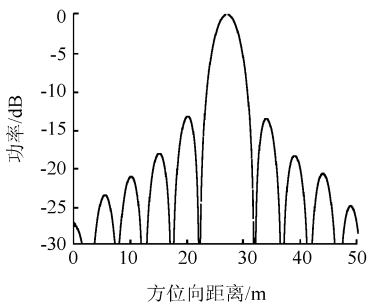
3 仿真结果

为验证高速俯冲弹载 SAR 成像处理的有效性,对点阵目标进行了计算机仿真生成原始回波信号,主要仿真参数如表 1 所示,其中 B_w 为调频信号带宽,F_{sam}为采样率,T_p 为脉冲宽度,T_{sub}为脉冲积累时间.

表 1 计算机仿真主要雷达系统参数

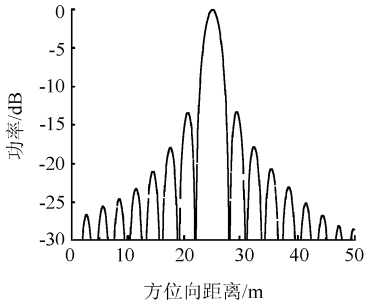
参数	B_w/MHz	F_{sam}/MHz	P_{rf}/kHz	T_p/μs	θ_L/(°)	λ/m
数值	50	60	10	5	40	0.02
参数	T_{sub}/s	V_x/(m·s^{-1})	V_y/(m·s^{-1})	H_0/km	θ/(°)	φ_{ref}/(°)
数值	0.03	1 500	−1 000	20	135	87

对子孔径数据利用 ECS 算法进行成像处理,图 4 给出单点目标冲击响应的方位向和距离向剖面图、三维效果以及平面投影图.

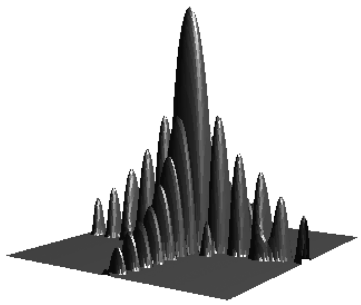


a 方位向剖面图

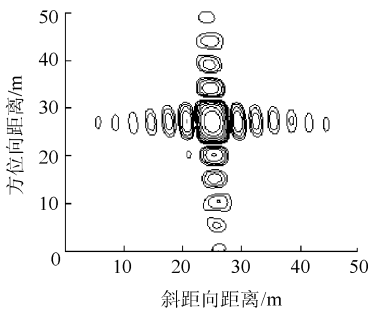
表 2 给出了点阵场景近距、中距和远距各两个点目标方位向分辨率(δ_a),峰值旁瓣比(P_a)以及积分旁瓣比(I_a)和距离向分辨率(δ_r),峰值旁瓣比(P_r)以及积分旁瓣比(I_r)指标评估结果.



b 斜距向剖面图



c 三维效果图



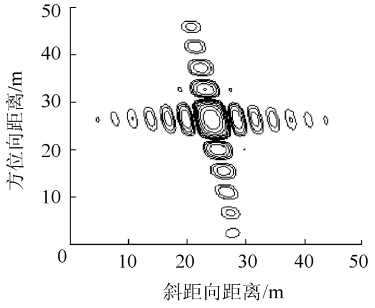
d 平面投影图

图 4 点目标图像质量评估效果图(未加权)

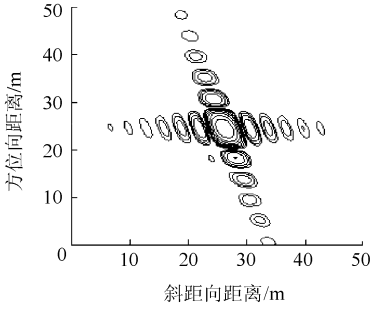
从点目标指标可以看出本文算法能够对俯冲模型的Burst模式数据进行高分辨率成像处理. 为了进一步验证成像算法在较大斜视角情况下的适应性,通过调整入射角可以改变参考点的等效锥角,得到的点目标的冲击响应等高线投影如图 5 所示.

表 2 点目标图像质量评估结果

项目	δ_a/m	P_a/dB	I_a/dB	δ_r/m	P_r/dB	I_r/dB
近距 1	4.24	−13.39	−10.49	2.68	−13.28	−10.38
近距 2	4.23	−13.21	−10.70	2.68	−13.23	−10.27
中距 1	4.25	−13.16	−10.55	2.67	−13.49	−10.41
中距 2	4.29	−13.12	−10.82	2.66	−13.36	−10.32
远距 1	4.29	−13.33	−10.26	2.68	−13.19	−10.27
远距 2	4.30	−13.31	−10.95	2.68	−13.37	−10.51
均值	4.27	−13.25	−10.63	2.67	−13.32	−10.36
理论值	4.286	−13.26	−9.90	2.658	−13.26	−9.90



a　$\theta_L = 30°, \varphi_{ref} = 79°$



b　$\theta_L = 20°, \varphi_{ref} = 71°$

图 5　不同入射角(等效锥角)下的点目标响应等高线投影图

为验证本文提出的校正方法,设置了大面积均匀点阵,场景为平行 X 和 Z 轴间隔为 200 m×200 m 的均匀点阵. ECS 成像处理后,经过几何校正和像素投影(校正后图像像素间隔 10 m×10 m. 校正后图像如图 6 所示.

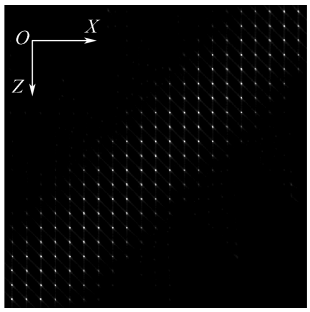


图 6　几何校正后功率图像

经过测量校正后图像点目标位置与设定位置不超过一个像素的误差,证明几何校正方法是可行的. 由于考虑了天线调制的影响(为验证算法满足宽测绘带要求,距离向天线做展宽处理),波束脚印应为上图所示的对角线区域. 另外由于测绘带比较宽,数据距离向分 8 块处理,处理完毕作了拼接处理.

4　结　论

基于俯冲模型的合成孔径雷达作为一种更具一般性的 SAR,能够满足一些特殊的应用需求. 由于俯冲速度的存在信号多普勒参数随距离门变化较快,特别是 SAR 不能工作在等效正侧视模式时,采用基于斜视的改进 ECS 算法能够进行高精度成像,并通过本文给出的几何校正算法能够完成图像的几何校正处理. 计算机仿真结果证明本文的成像和校正算法是可行的.

参考文献 (**References**)

[1] 孙　兵,周荫清,陈　杰,等. 高速俯冲 SAR 成像方法研究[J]. 电子与信息学报,2004,26(9):173 ~ 180
Sun Bing, Zhou Yinqing, Chen Jie, *et al*. Imaging method of missile-borne SAR with high diving speed[J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2004, 26(9):173 ~ 180(in Chinese)

[2] Alberto M, Josef M, Rolf S. Extended chirp scaling algorithm for air and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5):1123 ~ 1136

[3] 黄　岩,李春升,陈　杰,等. 高分辨率星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3):35 ~ 38
Huang Yan, Li Chunsheng, Chen Jie, *et al*. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging[J]. Acta Electronic Sinica, 2000, 28 (3):35 ~ 38(in Chinese)

[4] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京:科学出版社,2001. 160
Wei Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001. 160(in Chinese)

[5] 文　竹,周荫清,陈　杰. 基于 ECS+FIR 的星载 SAR 快视成像算法[J]. 电子学报,2004, 32(6):933 ~ 937
Wen Zhu, Zhou Yinqing, Chen Jie. A new quick-look algorithm for spaceborne synthetic aperture radar based on ECS + FIR[J]. Acta Electronic Sinica, 2000,32(6):933 ~ 937(in chinese)

[6] 魏　杰,周荫清,李春升. 星载 ScanSAR 辐射校正和图像拼接[J]. 电子与信息学报,2004,26(9):481 ~ 486
Wei Jie, Zhou Yinqing, Li Chunsheng. Radiometric correction and mosaic of subimages of spaceborne ScanSAR[J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2004, 26(9):481 ~ 486 (in Chinese)

[7] John C C. Synthetic aperture radar systems and signal processing[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1991. 374 ~ 376